

УДК 625.717.2

Перова О.С., Угненко Є.Б., д-р. техн. наук, Твердохліб С.П.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ВИЗНАЧЕННІ КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ

**Анотація.** В роботі проаналізовані існуючі засоби вимірювання фрикційних властивостей аеродрому. Розглянута необхідність введення нормативного значення коефіцієнта зчеплення. Наведена математична модель руху повітряного судна по покриттю.

**Ключові слова:** коефіцієнт зчеплення, злітно-посадкова смуга, вимірювальне колесо, умови гальмування, покриття, аеродром, повітряне судно, фрикційні властивості.

**Аннотация.** В работе проанализированы существующие средства измерения фрикционных свойств аэродрома. Рассмотрена необходимость введения нормативного значения коэффициента сцепления. Приведена математическая модель движения воздушного судна по покрытию.

**Ключевые слова:** коэффициент сцепления, взлетно-посадочная полоса, измерительное колесо, условия торможения, покрытие, аэродром, воздушное судно, фрикционные свойства.

**Abstract.** The paper analyzed the existing instruments for measuring the frictional properties of airfields. The need for a normative values of the coefficient of friction are considered. Shows a mathematical model of the motion of the air on the coating.

**Keywords:** friction coefficient, runway, measuring wheel braking conditions, coverage, airfield, aircraft friction properties.

### Вступ

Коефіцієнт зчеплення (КС) поверхні наземного покриття, що визначає міру зчеплення її з колесами транспортного засобу, в усьому світі є предметом дослідження і виробництва робіт по його виміру і збільшення на поверхні злітно-посадкових смуг (ЗПС) аеродромів та автодорожніх покриттів шляхом нанесення поперечних насічок і застосування високофрикційних матеріалів з

метою підвищення безпеки посадки повітряних суден і руху транспортних перевезень.

Основним критерієм стану ЗПС є умови гальмування на її покритті. В якості кількісного показника використовують значення граничних (максимальних) коефіцієнтів зчеплення, виміряні наземними засобами, так, як вони дозволяють найбільш повно характеризувати стан покриттів і потенційно можливе гальмування.

**Методи вимірювання коефіцієнта зчеплення за допомогою гальмування автомобіля.** Існуючі методи оцінки зчіпних властивостей покриттів мають в своєму складі чотири основні - метод РОСДОРНДІ, за допомогою гальмування автомобіля, з використанням спеціальних причепних приладів, та метод безконтактної оцінки покриття.

- **метод "РОСДОРНДІ"** – заключається у вимірюванні ординати мікропрофілю поверхні покриття за допомогою профілометра, за якими визначають залежність  $y = f(x)$ , що описує мікропрофіль на фіксованому проміжку. З цієї залежності визначають довжину кривої мікропрофілю і параметри  $K_i$  шорсткості дорожнього покриття за розрахунковими формулами. Прилад дозволяє спростити і здешевити метод вимірювання, а також усунути необхідність зволоження покриття.

У пропонованому методі визначення коефіцієнта зчеплення покриття, вимірюються геометричні параметри шорсткості сухого або мокрого покриття; ці параметри виводяться на пристрій відображення; за цими параметрами обчислюються показники шорсткості покриття шляхом отримання реалізації профілю (або ряду профілів) поверхні, обчислення довжини реалізації цього профілю (довжин реалізації) або похідною цієї реалізації (цих реалізації); обчислюються значення коефіцієнта зчеплення по регресійній кривій і отримані коефіцієнти зчеплення виводяться на індикатор. [1]

До методів вимірювання за допомогою гальмування автомобіля

**метод динамічного гальмування** – електродвигун працює в генераторному режимі, при цьому вимірююче колесо котять по поверхні покриття, а його механічна енергія обертання передається на генератор постійного струму, перетворюється в електричну і виділяється у вигляді теплової енергії в активному навантаженні при цьому визначають нормальне навантаження  $P$  вимірювального колеса на поверхню аеродромного покриття,

що відрізняється тим, що додатково визначають подовжню силу зчеплення ( $P_{зч}$ ) вимірювального колеса з поверхнею аеродромного покриття при заданій пробуксовці (прослизанні) вимірювального колеса, коли маточина вимірювального колеса через каретку впливає на датчик сили, при стабілізації нормального навантаження  $P$  вимірювального колеса на поверхню покриття значення коефіцієнта динамічного гальмування  $k$  визначають при таруванні пристрою, при цьому максимальне значення коефіцієнта зчеплення ( $K_{зч.max}$ ) обчислюють за формулою:

$$K_{зч.max} = \frac{P_{зч}}{P} k, \quad (1)$$

де  $K_{зч.max}$  - максимальне значення коефіцієнта зчеплення вимірювального колеса з поверхнею аеродромного покриття

$P_{зч}$  - подовжня сила зчеплення вимірювального колеса з поверхнею аеродромного покриття, виміряна датчиком сили, при заданому значенні пробуксовки (прослизанні) вимірювального колеса, Н;

$P$  - нормальне навантаження вимірювального колеса на поверхню аеродромного покриття, Н;

$k$  - коефіцієнт динамічного гальмування, який обчислюють при таруванні пристрою.

- **метод гальмування** - по поверхні штучного покриття котять вимірювальне колесо, яке гальмують відповідно до стану поверхні покриття, при цьому визначають нормальну силу  $P$  навантаження вимірювального колеса на поверхню покриття, що відрізняється тим, що додатково визначають момент сили гальмування ( $M$ ), створований електромагнітним гальмом або іншим пристроєм гальмування, і момент сили зчеплення ( $M_g$ ) вимірювального колеса з поверхнею покриття, а потім постійно підтримують рівність моменту сили гальмування ( $M$ ) і моменту сили зчеплення ( $M_g$ ) ( $M = M_g$ ), при цьому між вимірювальним колесом і поверхнею штучного покриття отримують максимальне гальмівне зусилля  $P_{гал.max}$ , яке дорівнює силі зчеплення  $P_{зч}$  вимірювального колеса з поверхнею покриття ( $P_{гал.max} = P_{зч}$ ,  $P_{зч} = P \cdot K_{зч}$ ); коефіцієнт зчеплення розраховують за формулою:

$$K_{зч.max} = \frac{M_g}{P \cdot R}, \quad (2)$$

де  $K_{зч.маx}$  - максимальне значення коефіцієнта зчеплення вимірювального колеса з поверхнею аеродромного покриття;

$M_g$  - момент сили зчеплення вимірювального колеса з поверхнею покриття, Н·м;

$P$  - нормальне навантаження вимірювального колеса на поверхнею аеродромного покриття, Н;

$R$  - радіус вимірювального колеса, м. [2]

- **метод безконтактного вимірювання коефіцієнта зчеплення** – полягає у вимірюванні коефіцієнта зчеплення за допомогою спеціального мобільного датчика, який встановлюється на даху автомобіля і сканує поверхню покриття. Результати вимірювання реєструються за допомогою операційної системи Android або Apple та виводяться на екран планшетного пристрою. Результати вимірювань зберігаються в базі даних комп'ютера оператора.

**Прилади для визначення коефіцієнта зчеплення.** У авіапідприємствах усього світу вимірювачі коефіцієнта зчеплення буксирувані або встановлені на автомобілі виробляють завмер  $K_{зч}$ , прокочуючи вимірювальне колесо (ВК) по поверхні ШЗПС з фіксованим рівнем пригальмовування, а саме ковзання ВК під час руху. На ці вимірники коефіцієнта зчеплення маються набір вимог і параметрів ІКАО, який зумовлює умови експлуатації та особливості конструкції. [3]

В основі принципу роботи вимірювачів коефіцієнта зчеплення ASFT SAAB 9.5, Skiddometer BV-11, 6875 RFT, Douglas Mu-Meter лежить жорсткий зв'язок ВК з несучими колесами однієї осі жорстко пов'язаними між собою. В результаті чого не забезпечується безперервний режим виміру  $K_{зч}$  внаслідок не постійного рівня коефіцієнта ковзання вимірювального колеса:

- при русі по поверхні ШЗПС з гармонійними нерівностями (лід, сніг, вода, забруднення і т. п.) Під вимірювальним та опорними (несучими) колесами;

- залежна підвіска викликає самозбудні наростаючі коливання ( $\sim 410$ Гц) несучих коліс в діаметральній площини (Вобблінг). [4]

Так як принцип виміру коефіцієнта зчеплення цих вимірників опосередкований (обумовлений жорсткої кінематичної зв'язком вимірювального колеса з несучими), то вимірний  $K_{зч}$  залежить від діаметрів вимірювального колеса і несучих коліс, зміни розмірів, форми, маси або стану

ланцюгової передачі в слідстві руйнування (зношування) поверхневого шару при терті, температури навколишнього середовища і механізмів, ефекту «Шиммі» (Вобблінга).



**Рисунок 1** – Буксирований вимірювач коефіцієнта зчеплення



**Рисунок 2** – Будова залежної підвіски вимірювача

Внаслідок вищевказаних недоліків оцінка відхилення вимірюного значення коефіцієнта зчеплення від його істинного значення істотно залежить від стану поверхні ШЗПС (лід, сніг, вода, забруднення і т. П.) Під вимірювальним та опорними (несучими) колесами і становить  $\pm 0,1 - 0,15$  од.  $K_{зч}$  (вимоги ІКАО -  $0,05$  од.  $K_{зч}$ ).

Тому ці вимірники коефіцієнта зчеплення рекомендовані Міжнародною організацією цивільної авіації для використання з метою отримання довідкової інформації для здійснення ремонту ШЗПС, а не для прогнозування гальмування літаків [3].

**Математичне моделювання руху повітряного судна по злітно-посадковій смузі.** Впровадження математичного моделювання в практику авіаційних досліджень гальмується недостатньою інформаційної забезпеченістю таких складних систем (недостатньо достовірне знання

аеродинамічних характеристик ПС, характеристик двигунів і шасі, вельми грубе знання зовнішніх умов). Вирішення цієї проблеми пов'язано з розробкою все більш складних, комплексних та трудомістких методів ідентифікації характеристик ПС на шляху створення математичних моделей, заснованих на фізично вичірному описі основних явищ і процесів і реалізують так званий принцип "оптимальної неточності". На цьому напрямку досягнуто певних успіхів, що дозволяють вже сьогодні в ряді випадків ідентифікувати не тільки індивідуальні особливості ПС, а й незареєстровані зовнішні умови.

Численні розрахункові експерименти на математичні моделі літаків Іл-96-300, Іл-96Т і Ту-154 показали систематичне відхилення значень коефіцієнта зчеплення від заміряних на ЗПС під час ЧИ. Крім того, виявилось нереальним використання значень коефіцієнта зчеплення поза діапазону [0,21 - 0,75] для руху по ЗПС без глісування.

Тому для уточнення коефіцієнту зчеплення застосовується математична модель яка представлена нижче.

Статистичний аналіз експериментальних даних граничного коефіцієнта зчеплення.

За основу взята апроксимація РКІІ ГА:

$$\mu_{np} = \mu_{ВПП} \sqrt{\mu_{ВПП} - 0,25} + \left( -\sqrt{\mu_{ВПП} - 0,25} e^{0,02(v-40)} \right), \quad (2)$$

де швидкість задається в км / год. Ця апроксимація складена таким чином, щоб при швидкості 40 км / год  $\mu_{np}$  приймала значення  $\mu_{ВПП}$ . Крім того, в цьому вираженні мається на увазі той факт, що виміри на слизькій ВПП на практиці не призводять до значень  $\mu_{ВПП} \leq 0,25$

Для аналізу представимо цей вираз в більш загальному вигляді

$$\mu_{np} = M_{np} \left( \mu_{ВПП}, P_{nn} \right) \sqrt{M_{np} \left( \mu_{ВПП}, P_{nn} \right) \mu_0 + \left( -\sqrt{M_{np} \left( \mu_{ВПП}, P_{nn} \right) \mu_0} \right) \cdot e^{0,02(v-40)} - b}, \quad (3)$$

де швидкість вимірюється в км/год, а значення  $M_{np}(\mu_{ВПП}, P_{nn})$ ,  $\mu_0$ ,  $a$  і  $b$  будуть вибиратися на основі регресійного аналізу.

$$M_{np} = 0,16 - e^{-7,4 \cdot 0,1 \cdot P_{nn}^8} + 0,58 \text{ для сухої ЗПС} \quad (4)$$

$$M_{np} = 0,20 - e^{-62,7 \cdot 0,1 \cdot P_{nn}^8} + 0,40 \text{ для мокрої ЗПС} \quad (5)$$

$$M_{np} = 0,16 - e^{-41 \cdot 0,1 \cdot P_{nn}^8} + 0,37 \text{ для ЗПС з мокрим снігом} \quad (6)$$

де  $\mu_0$  - поправка, 0,25;

$a$  – плече поздовжнього зміщення нормальної реакції поверхні ЗПС;

$b$  – плече поперечного зміщення нормальної реакції поверхні ЗПС;

$$a = k \cdot \left( 0,000059 + 0,00033 \cdot e^{\frac{b_{nn}^2 - 5,86^2}{600}} \right) \text{ для сухої та мокрої ЗПС} \quad (7)$$

де  $k = 0,79 + 0,35 \mu_{ВПП}$

$$a = 0,000105 + 0,000399 \cdot e^{\frac{b_{nn}^2 - 7,928^2}{600}} \text{ для ЗПС з шаром снігу} \quad (8)$$

$$b = 0,22 \cdot e^{\frac{P_{nn}^4}{6700}} + 0,17 \text{ для сухої ЗПС} \quad (9)$$

$$b = 0,23 \cdot e^{\frac{P_{nn}^4}{1400}} + 0,12 \text{ для мокрої ЗПС} \quad (10)$$

$$b = 0,03 \cdot e^{\frac{b_{nn}^2 + 5,9^2}{900}} + 0,17 \text{ для ЗПС з шаром снігу} \quad (11)$$

де  $e$  – обчислення пневматика. [5].

### Висновки

В даний час в області фінансування методів оцінки зчепних властивостей аеродромних і дорожніх покриттів склалося складне становище. Воно полягає в тому, що в кожній країні, в тому числі і в Україні, створено багато приладів, що мають абсолютно різні принципи роботи і основні технічні характеристики. Тому виміряні за допомогою кожного з цих пристроїв коефіцієнти зчеплення різко відрізняються між собою. Все це вносить плутанину при використанні результатів оцінки гальмування на ЗПС. Дані проблеми вітчизняної авіації потребують негайного їх вирішення. Так як Україна не користується міжнародними нормами ІКАО, потрібно дослідити і вирішити необхідність введення нових експлуатаційних норм і показників. Положення, що створилося

особливо неприйнятно для цивільної авіації. І якщо для дорожньої галузі в якійсь мірі достатня внутрішньодержавна стандартизація засобів і методів оцінки зчпних властивостей дорожніх покриттів, то для цивільної авіації нагальною потребою є стандартизація в цьому питанні в міжнародному масштабі.

Проаналізовано існуючі методи визначення коефіцієнта зчеплення. Аналіз показав, що найкращим і найточнішим методом являється визначення коефіцієнта зчеплення за допомогою спеціальних приладів.

### **Література**

1. Проектування аеропортів: підруч. Для студ. вищ. Навч. закл./ М.Ф. Дмитриченко, М.М. Дмитрієв, О.М. Папченко [та ін.]. – К.: НТУ, 2010. – 248 с.: іл.. – Бібліогр.: 239 – 240 с.
2. Запорожець В.В., Шматко М.П. Аеропорт: організація, технологія, безпека: Навч. посібник. – К.: Дніпро, 2002.
3. Руководство по аэропортовым службам. Часть 2. Состояние поверхности покрытия : Doc 9137-AN/898. – Издание четвертое – ICAO, 2002. – IV, 126 с. – (Нормативный документ Международной организации гражданской авиации. Руководство).
4. Состояние поверхности ВПП : оценка, измерение и представление данных: Cir 329-AN/191. – ICAO, 2012., 68 с. – (Нормативный документ Международной организации гражданской авиации. Руководство).
5. Кубланов М.С. Математическое моделирование задач летной эксплуатации воздушных судов на взлете и посадке: Монография. – Москва – 2013.

#### **Рецензенти:**

Павлюк Д.О., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.  
Кизима С.С., канд. техн. наук, Національний транспортний університет.

#### **Reviewers:**

Pavliuk D.O., Dr. Tech. Sci., National Transport University.  
Kyzyma S.C., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **22.06.2016 р.**